

$$j_0 = \sigma \gamma \left(E + \frac{1}{c} [\mathbf{uB}] \right), \quad \tilde{j}_0 = \tilde{\sigma} \gamma \left(H - \frac{1}{c} [\mathbf{uD}] \right);$$

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - u^2/c^2}.$$

Их явная ковариантность устанавливается эквивалентной формой записи (И. Е. Тамм, 1924; М. И. Рязанов, 1957; Б. М. Болотовский, С. Н. Столяров, 1977)

$$H^{\alpha\beta} = \tilde{\epsilon}^{\alpha\beta\nu} F_{\nu\mu},$$

$$\tilde{\epsilon}^{\alpha\beta\nu} = \mu^{-1} [\delta^{\alpha\nu} - (\epsilon\mu - 1) u^\alpha u^\nu] [\delta^{\beta\nu} - (\epsilon\mu - 1) u^\beta u^\nu],$$

$$j_0^\alpha = \sigma F_{\beta 0}^\alpha, \quad \tilde{j}_0^\alpha = \tilde{\sigma} H_{\beta 0}^\alpha, \quad u^\beta = (\gamma c, \gamma \mathbf{u}).$$

Соответствующим образом меняются и граничные условия (24). Напр., в отсутствие поверхностных зарядов и токов на границе раздела сред, движущейся с локальной скоростью u' , наряду с нормальными компонентами индукций D , B должны быть непрерывны тангенциальные компоненты векторов

$$E + [vB]/c, \quad H - [vD]/c.$$

Электромагнитные взаимодействия в среде. Неоднородное движение среды или движение одних элементов среды относительно других нарушает её изотропию и равносность, делает возможными неустойчивость и усиление эл.-магн. волн за счёт кинетич. энергии вещества (см., напр., *Неустойчивости плазмы*), видоизменяет потенциалы Льебнера — Вихерта, в частности кулоновское поле покоящегося заряда, а при наличии временной дисперсии частично переводит её в пространственную (и наоборот). Уже в покоящейся среде собственное поле и поле излучения к-л. источников, напр. движущихся заряж. частиц, могут качественно отличаться от поля в вакууме, даже если отвлечься от их непосредств. столкновений с частицами среды, вызывающих искривление траекторий, ионизац. потери и др. Дело в том, что наряду с колебаниями эл.-магн. поля неизбежно должны возбуждаться самосогласованные колебания зарядов в среде; в частности, излучаться могут только нормальные волны. Так, на тормозное излучение, эл.-магн. массу, эфф. заряд и радиац. трение быстрой частицы принципиально влияет вызываемая её движением переполаризация среды (Э. Ферми, 1940). Эти явления наблюдаются, напр., при *каналировании заряженных частиц* в кристаллах или в газах. Обнаруживаются возможность *Черенкова — Ваилова излучения, переходного излучения и ондуляторного излучения*, аномального *Доплера эффекта* и др. особенности излучения монополюсных, дипольных и мультиполюсных конфигураций зарядов. Изменяется характер распространения излучения, в т. ч. геом. оптика и дифракция, особенно в нестационарной и неоднородной среде. В результате меняется эффективность взаимодействия зарядов.

Ситуация может усложняться нелинейными свойствами эл.-магн. волн и их взаимодействий с частицами, а также разл. процессами рассеяния на упругих, тепловых и др. неэлектромагн. возбуждениях среды. Скажем, возможно нелинейное черенковское излучение под действием короткого импульса сильного эл.-магн. поля, возбуждающего на своём пути нелинейную поляризацию среды в отсутствие к-л. сторонних зарядов и токов (см. также *Электродинамика движущихся сред*).

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теоретическая физика, т. 2, 4, 8, М., 1980—89; Джексон Дж., Классическая электродинамика, пер. с англ., М., 1965; Агранович В. М., Гинзбург В. Л., Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов, 2 изд., М., 1979; Вейнберг С., Гравитация и космология, пер. с англ., М., 1975; Стражев В. И., Томильчик Л. М., Электродинамика с магнитным зарядом, Минск, 1975; Гинзбург В. Л., Теоретическая физика и астрофизика, 3 изд., М., 1987; Гроот С. Р. де, Сатторп Л. Г., Электродинамика, пер. с англ., М., 1982; Туров Е. А., Материальные уравнения электродинамики, М., 1983; Железняков В. В., Кочаровский В. В., Кочаровский В. В., Волны поляризации и свержизлучение в активных средах, «УФН», 1989, т. 159, с. 193.

В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД — раздел электродинамики, в к-ром рассматриваются эл.-магн. явления в равномерно движущихся средах, т. е. распространение и излучение в них эл.-магн. волн.

Эксперим. материал по Э. д. с. накапливался и теоретически осмысливался в течение неск. веков (см. *Аберрация света, Доплера эффект, Оптика движущихся сред, Майкельсона опыт, Рентгена опыт, Роуленда опыт, Физо опыт, Эйхенвальда опыт*). Полное объяснение этого материала стало возможным только после создания А. Эйнштейном (1905) спец. теории относительности.

В 1908 Г. Минковский (G. Minkowski) показал, что *Максвелла уравнения* для покоящихся сред в сочетании с принципом относительности Эйнштейна однозначно определяют эл.-магн. поле в движущейся среде. Ур-ния для полей в движущейся с пост. скоростью и изотропной среде совпадают с ур-ниями Максвелла в покоящейся среде, однако материальные соотношения между напряженностями электрического E и магнитного H полей и соответствующими индукциями D и B имеют более сложный, чем в покоящейся среде, вид:

$$D + c^{-1} [uH] = \epsilon \{ E + c^{-1} [uB] \},$$

$$B - c^{-1} [uE] = \mu \{ H - c^{-1} [uD] \},$$

где ϵ и μ — диэлектрич. и магн. проницаемости покоящейся среды. Материальные ур-ния Минковского (1) и ур-ния Максвелла удовлетворительно объясняют результаты всех экспериментов по изучению эл.-магн. явлений в движущихся средах, в частности по распространению света в движущейся среде (абберрация света, опыт Физо) и по отражению и преломлению эл.-магн. волн на движущихся границах раздела.

Поля и их потенциалы в движущейся среде. Поля источников излучения удобно описывать с помощью ур-ний Максвелла — Минковского, записанных в релятивистски инвариантном (ковариантном) четырёхмерном виде:

$$\frac{\partial H_{ik}}{\partial x_k} = \frac{4\pi}{c} j_i, \quad \frac{\partial F_{ik}}{\partial x_l} + \frac{\partial F_{kl}}{\partial x_i} + \frac{\partial F_{li}}{\partial x_k} = 0,$$

$$H_{ik} = \epsilon_{ikst} F_{st},$$

(ϵ_{ikst} — четырёхмерный тензор диэлектрич. проницаемости 4-го ранга; $i, k = 1, 2, 3, 4$).

Четырёхмерные антисимметричные тензоры полей F_{ik} и индукций H_{ik} , составленные соответственно из компонент векторов $(B, -iE)$ и $(H, -iD)$ в декартовой системе координат имеют вид:

$$F_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & B_z & -B_y & -iE_x \\ -B_z & 0 & B_x & -iE_y \\ B_y & -B_x & 0 & -iE_z \\ iE_x & iE_y & iE_z & 0 \end{pmatrix};$$

$$H_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & H_z & -H_y & -iD_x \\ -H_z & 0 & H_x & -iD_y \\ H_y & -H_x & 0 & -iD_z \\ iD_x & iD_y & iD_z & 0 \end{pmatrix}.$$

а четырёхмерные векторы x_k и j_i связаны с декартовыми компонентами векторов $r(x, y, z)$ и плотностью тока j соотношениями

$$x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z, x_4 = ict,$$

$$j_1 = j_x, j_2 = j_y, j_3 = j_z, j_4 = ic\rho,$$

где ρ — плотность заряда [по повторяющимся индексам в (2), (3) и далее проводится суммирование].

Ковариантная запись ур-ний Максвелла (2) и материальных соотношений в форме (3), предложенной Л. И. Мандельштамом и И. Е. Таммом, позволяет обобщить эти ур-ния на неинерциальные системы отсчёта и неинерциально движущиеся среды методами *общей теории относительности*.